

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE FÍSICA
CAIXA POSTAL 20516
01000 - SÃO PAULO - SP
BRASIL



08 AGO 1983

publicações

IFUSP/P 356

B.I.F. - USP

2 IFUSP/P-356

A INSEPARABILIDADE QUÂNTICA EM PERSPECTIVA, OU: POPPER,
EINSTEIN E O DEBATE QUÂNTICO ATUAL

por

Michel Paty

Centro de Pesquisas Nucleares e Universidade Louis Pasteur,
Strasbourg, França

Agosto/1982

A INSEPARABILIDADE QUÂNTICA EM PERSPECTIVA, OU: POPPER, EINSTEIN E
O DEBATE QUÂNTICO ATUAL*

POR

MICHEL PATY**

[APRESENTADO NO COLÓQUIO "POPPER E A CIÊNCIA DE HOJE", CERISY-LA-SALLE, 2-11, JULHO 1981. E NA 34ª REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 9/7/82, CAMPINAS.]

RESUMO

A interrogação sobre a completude da mecânica quântica, ou sobre a capacidade desta teoria tratar completamente o seu objeto, conheceu, do paradoxo EPR ao teorema de Bell, desenvolvimentos cuja análise permite delinear a relação que a física mantém com a filosofia em sua problemática. Tentamos retrazar esta decantação, através da questão da inseparabilidade ou não-localidade, mostrando sob que condições passamos de uma experiência de pensamento a uma experiência efetiva, ou seja à possibilidade de uma falsificação. Nos dedicamos em seguida a diversas considerações sobre a maneira de pensar a inseparabilidade numa filosofia crítica realista, preservando a objetividade; esta questão deve ser relacionada com a significação filosófica de uma teoria quântica da medida e notadamente com a interpretação objetiva das probabilidades.

* O original francês está em publicação na revista Fundamenta Scientia,3,1982.

** Centro de Pesquisas Nucleares e Universidade Louis Pasteur, Strasbourg, França. Endereço Postal: CRN, F-67037, Strasbourg CEDEX.

A INSEPARABILIDADE QUÂNTICA EM PERSPECTIVA, OU: POPPER, EINSTEIN E
O DEBATE QUÂNTICO ATUAL

A mecânica quântica, operando desde o seu surgimento nos ramos mais diversos da física contemporânea, não cessou de ser testada experimentalmente, sempre com sucesso. O campo de seus questionamentos possíveis é imenso; no entanto, todas as experiências feitas até hoje a fortalecem. Porém, ainda se coloca a seu respeito a questão de saber se esta teoria é completa. É necessário, é claro distinguir entre uma teoria completa e uma teoria definitiva: mesmo os seus partidários mais fervorosos não acreditam que a teoria quântica seja uma teoria definitiva e os físicos atuais são mais modestos a este respeito - ou céticos - que os da época, não tão distante, quando a física clássica parecia no ápice do seu aca-
bamento. Certamente, a mecânica quântica constitui, pelos seus conceitos, seus axiomas ou princípios, e o seu formalismo, o núcleo e a estrutura de toda teoria física da matéria: mas ela não esgota estas teorias na medida em que ela própria não é uma dinâmica. A eletrodinâmica quântica e as teorias mais recentes de outros campos de força não se reduzem à mecânica quântica na sua formulação bem estabelecida⁽¹⁾, e se apresentam como construções teóricas realizadas a partir da mesma. Mas essas construções, no seu processo tanteante, não se interrogam - no momento - sobre a completitude da mecânica quântica, da qual adotam os princípios (mesmo se colocam algumas vezes o problema da justaposição das concepções quânticas,

e das exigências relativistas, tão heterogêneas como se sabe). Nenhum corpo de teoria parece justificar melhor do que estas a asserção de Dummett-Quine sobre a impossibilidade de testar separadamente as partes: aqui, não somente o núcleo teórico, mas também as suas proposições fundamentais. Superada a barreira de seu primeiro estabelecimento, a mecânica quântica escapará a possibilidade de não ser falsificada? Sob esta forma provocante, a questão que se delinea é sobre a estabilidade das concepções que estão à base da teoria quântica e que parecem bem modelar doravante a aproximação do conhecimento em física. No entanto, estas concepções, precisas num plano formal, cercam-se de uma certa imprecisão quanto ao que se convencionou chamar de "interpretação". Acima do formalismo e da construção teórica, o panorama das idéias quânticas parece marcado por uma ambiguidade da problemática, ou pelo menos do seu vocabulário, na medida em que se parece passar em certas questões de fundo, indistintamente de uma formulação física a uma formulação filosófica e inversamente.

Mas, na verdade, a distinção é possível: o caso do conceito de inseparabilidade é um testemunho exemplar. Os desenvolvimentos aos quais o mesmo deu lugar após o estabelecimento da mecânica quântica permitiram precisamente resolver a ambiguidade e da clareza à imagem que era difusa, centrando separadamente os dois focos, um físico, outro filosófico, de sua problemática. Esta clareza adquirida sobre o conceito nos conduz a Popper, porque esta se exprime na possibilidade de uma falsificação simples mas de implicação singularmente rica: a da propriedade de não-separabilidade e, ao mesmo tempo, da mecânica quântica. O aspecto picante desta história é que a referência a Popper não se impõe somente pela consideração, em verdade notável mas finalmente muito geral, da falsificabilidade de uma teoria⁽²⁾, esta teoria sendo a mecânica quântica, pela qual Popper sempre mostrou um interesse preciso; mas porque

nos primórdios mesmo desses desenvolvimentos se encontra um raciocínio de Popper, errôneo na verdade e refutado por Einstein⁽³⁾, mas donde a idéia diretora era muito próxima da exposta mais tarde por este último e conhecida sob o nome de paradoxo EPR. A idéia foi mesmo avançada - os raciocínios errôneos não são necessariamente os menos fecundos - que a experiência imaginária de Popper poderia estar na origem do argumento que conduzia a anunciar este paradoxo de onde parte todo o resto⁽⁴⁾. Propondo uma interpretação "objetiva estatística" das relações de incerteza de Heisenberg - segundo a qual estas últimas não concerniam o comportamento individual de micro-partículas, mas somente das distribuições estatísticas⁽⁵⁾ -, Popper descrevia uma experiência mental que visava questionar a interpretação que Bohr e Heisenberg davam a essas relações e que lhe parecia demasiada. Esta experiência tratava da interação de duas partículas e da correlação entre as impulsões e as posições das partículas difundidas que resultava da conservação da energia - impulsão na reação. Se o raciocínio de Popper é na realidade impossível de ser seguido até o fim - a medida de impulsão que ele propõe modifica de fato a posição, e vice-versa -, a idéia de correlação a distância a partir de leis de conservação que aí se encontra é de uma importância decisiva.

É possível então de distinguir uma da outra as formulações - e as abordagens - física e filosófica da mecânica quântica: é a resolução destes dois termos - tanto um como outro necessários, mas a níveis diferentes - que este trabalho é consagrado, a respeito da inseparabilidade quântica. Esta resolução tornou-se possível graças à decantação que operam a prática do formalismo e o amadurecimento dos problemas. Nós nos propomos a seguir o traçado que conduz da idéia da correlação quântica à distância - isto é, do enunciado do paradoxo EPR - à realização dos testes experimentais da inseparabilidade quântica, após o teorema de Bell, ou seja, proce-

der a uma colocação em perspectiva, histórica e epistemológica, desta última. Nós nos preocuparemos em seguida em recentrar o foco "filosófico" de nosso problema, interrogando-nos sobre a maneira de pensar a inseparabilidade segundo o programa de uma filosofia realista crítica preservando a objetividade. Nós veremos como esta questão se relaciona, no seu ponto de fuga, à do alcance epistemológico de uma teoria quântica da medida que acreditamos poder abarcar, de nossa parte, com o auxílio de uma concepção objetiva das probabilidades, e que a tomada em consideração da inseparabilidade permite delimitar.

A IDÉIA DE CORRELAÇÃO À DISTÂNCIA NO DEBATE ENTRE O REALISMO DETERMINISTA E A INTERPRETAÇÃO ORTODOXA

O paradoxo levantado em 1935 por Einstein, Podolski e Rosen (paradoxo EPR)⁽⁶⁾, que acaba por colocar em evidência o conceito especificamente quântico da não-separabilidade, se situa numa problemática de interpretação da mecânica quântica - por oposição a uma problemática de constituição onde apareceram outros conceitos como a indiscernibilidade, ou conceitos provisórios como a dualidade onda-corpúsculo. Este traço lhe é comum com a concepção quântica da medida, com a qual está relacionado. A primeira questão que se coloca de maneira evidente é a de saber se o paradoxo - e a questão da inseparabilidade que lhe prolonga e lhe soluciona - e de natureza física ou epistemológica. Este intrinco, ou esta confusão, se apresenta de início em razão da ausência de clareza epistemológica sobre a significação e o alcance das concepções quânticas. Tratava-se, para Einstein e seus colaboradores, de interrogar-se sobre a completude da teoria quântica a partir da

significação das relações de Heisenberg, chamadas de incerteza ou de indeterminação: estas relações exprimem a impossibilidade de se conhecer simultaneamente, para um sistema quântico, os valores de duas variáveis conjugadas tais como a posição e a impulsão, ou de componentes diferentes do momento angular. Para Einstein, que reivindicava uma concepção realista e determinista da teoria física, este estado de coisas demonstrava o caráter insatisfatório - incompleto, mas não inexato - da mecânica quântica. O enunciado do paradoxo EPR se situa no debate famoso com o adversário Bohr: debate fecundo, como se sabe, e que, por esta última peripécia, deveria colocar em evidência este conceito de importância capital da teoria quântica, a inseparabilidade.

A teoria quântica não é completa, era o que proclamava em essência Einstein e seus colaboradores pois ela falha na representação de todos os elementos da realidade física. Estes últimos eram caracterizados pelo critério seguinte: "se, sem perturbar um sistema, nos podemos prever com certeza (isto é, com uma probabilidade igual a unidade) o valor de uma quantidade física, então existe um elemento da realidade física correspondente a esta quantidade física"⁽⁷⁾. Tratava-se, pelo enunciado de um critério de aparência muito geral, de ultrapassar o fim de não receber oposto geralmente pelos representantes da escola de Copenhague as objeções emitidas até então quanto ao princípio de incompatibilidade das variáveis conjugadas. Com efeito, a resposta geralmente dada da essas objeções era que, se as quantidades conjugadas não podem ser conhecidas simultaneamente, isto é, devido essencialmente a perturbação engendrada pela observação ou pela medida. Esta resposta ilustrada por múltiplas experiências imaginárias, propostas por Heisenberg com o apoio das relações de indeterminação, era perfeitamente coerente com o conjunto das idéias da escola de Copenhague, já que relacionava a caracterização de sistemas quânticos com a possibilidade de sua aproximação pelos instrumentos e o pensamento clássicos. Assim, somente deixava in-

satisfeitos os partidários de uma concepção realista, pela qual os sistemas físicos "microscópicos" devem ser considerados em si mesmos, de uma maneira objetiva e determinista (isto é, que suas leis não devem nada à influência ou à escolha de um ponto de vista do observador).

É precisamente o interesse do critério expresso pelo EPR o de propor um meio de pensar um elemento de um sistema físico sem levá-lo a uma operação direta de medida.

Consideremos então, com Einstein, Podolski e Rosen, a seguinte experiência de pensamento: seja um sistema M (Molécula) separando-se em dois subsistemas (átomos) A e B. As duas partículas se separam uma da outra de tal maneira que logo não mantem mais nenhuma interação entre elas. Uma vez separadas, qualquer medida sobre uma não pode influir sobre a outra, a menos de telepatia⁽⁸⁾ (ou, evidentemente, de transmissão de uma influência física se propagado a uma velocidade inferior ou igual a da luz). Se medimos a impulsão - ou uma componente do spin⁽⁹⁾ - da partícula B, a partícula A não será informada desta operação. Mas existe uma correlação, clássica, muito geral, entre as partículas A e B, que resulta das leis de conservação rigorosas entre as quantidades (impulsão, momento angular ou spin) do sistema inicial e do conjunto de subsistemas finais: qualquer que seja o momento em que se mede a impulsão de B, a impulsão de A está evidentemente correlacionada ($P_A = -P_B$ se $P_M=0$). Disto segue que, independente da distância entre as partículas A e B, a medida sobre B nos informa, sem perturbar A, o valor de sua impulsão. A impulsão de A é então um elemento da realidade física segundo o critério EPR. Nenhuma medida sobre A sendo efetuada, estamos livres para medir por exemplo a sua posição. Ora a mecânica quântica supõe que o conhecimento simultâneo destas duas quantidades conjugadas para A é impossível, quer dizer que a medida da posição de A impede o conhecimento de sua impulsão. Embora esta tenha sido predita sem nenhuma medida que a perturbas-

se, quer dizer mesmo que ela corresponda a um elemento de realidade. Donde o paradoxo, mostrando a vista do EPR um grave defeito de incompleticidade da mecânica quântica, que falha ao dar conta de todos os elementos da realidade física.

Bohr replica imediatamente a objeção invocando a inseparabilidade dos dois sub-sistemas do estado final⁽¹⁰⁾. No entanto, a sua formulação não era clara, toda impregnada que era de sua concepção da observação. O que estava em causa, segundo Bohr, no critério proposto por Einstein e seus colaboradores, era a expressão "sem perturbar o sistema". Com efeito, se os dois sistemas não são separados, a ponto de constituir um único sistema, uma medida sobre um é uma medida sobre o seu sistema comum; a inseparabilidade dos sistemas é a de suas funções de onda, que lhe representam, e esta está inscrita no formalismo quântico - e então existia já antes do argumento do EPR. Este último teve então por efeito descobrir a inseparabilidade, o que reconheceu Bohr em seguida. Mas este reconhecimento não foi neutro epistemologicamente, e Bohr, o fazendo, se referia a "influência sobre as condições precisas que definem os tipos de predições que se pode fazer sobre a evolução do sistema", condições que "constituem um elemento inerente à descrição de todo fenômeno ao qual se pode validamente atribuir o qualificativo de realidade". Esta definição - bastante vaga, deve-se dizer - era ainda muito marcada pelo operacionalismo, e vinha a dizer que o dispositivo para testar uma das quantidades conjugadas (relativa à partícula B) era incompatível com o de testar a outra (relativa à partícula A). Esta definição se inscrevia sem dificuldade na perspectiva do princípio de complementaridade e da aceção ortodoxa da noção de observação, compreendendo as condições desta última na definição das quantidades observadas.

Era então difícil, por esta razão, que os que mantinham com Einstein a necessidade para uma teoria física de ser objetiva, se satisfazem com tal explicação. Ademais, que os dois sistemas,

no entanto separados espacialmente por distâncias arbitrárias, não constituíssem que um só todo; era difícil de aceitar por quem considerava a necessidade de caracterizar espaço-temporalmente os sistemas físicos. Mas a inseparabilidade não se equivale a uma concepção filosófica como a de Bohr. Ela comporta alguma coisa de muito mais fundamental do que a escolha epistemológica acima tomaremos como prova - ou ao menos por índice - a evolução do pensamento de Bohr, e a sua elaboração da noção do "fenômeno quântico", que se pode ver como uma tentativa de se desembaraçar de uma vestimenta demasiado operacionalista⁽¹¹⁾.

DA EXPERIÊNCIA DO PENSAMENTO A EXPERIÊNCIA EFETIVA: O CRITÉRIO DE LOCALIDADE

A experiência de pensamento que se encontra no centro do argumento EPR constituía um teste da coerência da mecânica quântica e de sua interpretação: coerência interna de seu esquema lógico, e coerência da teoria em relação ao seu objeto. Imaginando uma experiência possível em princípio, Einstein e seus colaboradores concluíam numa contradição, sinal para eles de incompletitude; Bohr ao contrário refutava esse raciocínio desde o seu ponto de partida; quer dizer, recusava a legitimidade mesmo da experiência proposta que lhe parecia não paradoxal, mas tautológica. O ponto sobre o qual as duas concepções em presença se opunham fundamentalmente, através de premissas de raciocínio, era sobre a relação da teoria física e seu objeto. Este último deve ser tal como o requer o critério - que define um exemplo de realidade - invocado pelo EPR, independentemente das concepções quânticas? Trata-se, de certa maneira, de um critério absoluto? A não-separabilidade se inscreve em erro contra uma tal reivindicação. Mas devido a maneira como Bohr

a invocava, esta poderia parecer indissociavelmente ligada a sua própria aproximação epistemológica. Como tal, parecia se opor a todo programa ou perspectiva realista quanto ao papel da teoria física, e não podia ser recebida, pelos partidários de um tal programa, como uma resposta decisiva e sem apelo ao argumento EPR. Foi preciso para isso que ela fosse considerada como uma propriedade objetiva dos sistemas quânticos. Que os partidários de uma perspectiva realista não tenham podido enunciá-lo assim é demonstrativo da incerteza epistemológica que prevalecia então; esta incerteza estava ligada à questão do "indeterminismo" e da dificuldade em interpretar objetivamente a função de onda⁽¹²⁾. Bem como as respostas a este problema, a aceitação da inseparabilidade era considerada fundamentalmente como questão de escolha.

A descrição da experiência de pensamento não permitia - tal é a natureza deste tipo de raciocínio - nenhuma decisão independente das concepções epistemológicas adotadas. Estes para os quais a mecânica quântica é objeto de suspeita, por razões notadamente - mas não somente - ligadas às ambiguidades de interpretação podiam se sentir fundamentados a persistir na sua recusa da não-separabilidade. Ao contrário, os partidários da completitude - senão definitiva, pelo menos relativa aos problemas propostos - podiam, com Bohr, considerar a inseparabilidade como caracterizando legitimamente a aproximação quântica. Entre os dois, se a decantação filosófica fosse efetuada, poder-se-ia pensar em considerar a inseparabilidade como um propriedade objetiva dos sistemas quânticos; já que também uma aproximação objetiva da questão do "indeterminismo" e das probabilidades era conhecida⁽¹³⁾. De fato, a posição mais frequente quanto à inseparabilidade era uma simples neutralidade prática: ela funcionava dentro do formalismo, e se podia aceitá-la ou não como fundamental. A questão não parecia tão urgente, e nada parecia obrigar verdadeiramente a escolher.

O problema epistemológico de fundo era o do determinismo, e soluções realistas eram procuradas principalmente⁽¹⁴⁾ do lado das "variáveis escondidas".

Era uma matéria de debates periodicamente retomada, desde a obra de Von Neumann, saber se as variáveis - não observadas atualmente - encarregadas de restaurar o determinismo local clássico eram ou não compatíveis com as predições estatísticas da mecânica quântica⁽¹⁵⁾. Coube a Bell mostrar que as provas de incompatibilidade avançadas até então não eram de uma generalidade suficiente⁽¹⁶⁾. Indo mais longe, ele proporia um critério caracterizando o que permitiria a tais variáveis responder às exigências do determinismo clássico: este critério é o da localidade, e este apresenta a vantagem de superar o único caso de uma problemática de variáveis suplementares para designar uma propriedade muito geral dos sistemas físicos. O critério de localidade deveria expressar - no quadro probabilista que é o da mecânica quântica - a reivindicação que parecia tão natural a Einstein: cada uma das partículas provenientes do sistema inicial possui, a partir de sua separação, propriedades independentes uma da outra, quer dizer que cada uma constitui sozinha um sistema, o qual deve ser possível de determinar sem nenhuma referência a um outro - senão que pelas propriedades evidentes e clássicas de conservação, donde a consequência de que o resultado da medida de uma quantidade sobre o primeiro sistema deve ser independente de qualquer medida efetuada sobre o segundo.

Retomando a experiência descrita por Einstein e seus colaboradores, e posteriormente por Bohm, John Bell expressa esta propriedade fazendo intervir as variáveis "escondidas locais", que desaparecem em seguida das relações na ocasião de efetuar as médias. Ele obtém, como transcrição da condição de localidade, desigualdades - ou limites de correlação - entre as probabilidades relativas às grandezas dos sub-sistemas supostos. A Mecânica Quântica, que não

requer nenhuma condição de localidade, exige ao contrário, correlações estritas. Acontece, como Bell pode imediatamente mostrar, que estes limites de correlação e as correlações estritas não são totalmente compatíveis, e que, em certas condições precisas, as previsões da Mecânica Quântica são contraditórias com as do determinismo local subjacente⁽¹⁷⁾. Quem diz contradição diz aqui previsões diferentes e, por pouco que certas condições experimentais sejam disponíveis, falsifiabilidades possíveis de uma ou outra previsão. Por esta via, o debate sobre as correlações do EPR e da inseparabilidade deixava o terreno da pura confrontação epistemológica: uma decisão se tornou possível, independente das aproximações filosóficas, que seria imposta somente pelos fatos.

É conveniente assinalar aqui o avanço considerável que apresenta, no debate sobre as concepções quânticas, o critério de localidade tal que Bell o enunciou. Ele permite passar de uma experiência de pensamento a uma experiência de fato, e de romper uma certa circularidade dos raciocínios invocados. Não é o meu propósito descrever aqui o estado desta passagem, nem as experiências difíceis e minuciosas, das quais a de Aspect representa atualmente o ponto mais elaborado⁽¹⁸⁾. O real tem, parece, falado, e indicado uma confirmação da Mecânica Quântica e um questionamento da localidade nos sistemas quânticos. O que é testado pelas experiências de correlação a distância, é a inseparabilidade desses sistemas: quer dizer, esta propriedade específica que Bohr havia ressaltado, e que resulta do formalismo quântico no seu conjunto. Evidentemente, o aspecto epistemológico dos problemas da Mecânica Quântica não desapareceram devido a isto. A inseparabilidade não obriga à tradução dada por Bohr em termos de aproximação; o que é modificado, desde então, é a caracterização do problema em termos realistas⁽¹⁹⁾: mais profundamente do que uma simples necessidade da aproximação, a non-separabilidade aparece como uma propriedade dos sistemas. (Nós vol-

taremos mais longe sobre os problemas conceituais colocados por uma propriedade tão pouco clássica).

O critério de localidade, testado pela experiências das desigualdades de Bell, não designa, embora aparente, uma proposição (a inseparabilidade) - propriedade ou princípio - isolada, da Mecânica Quântica⁽²⁰⁾. A inseparabilidade já existia, nós já vimos, antes de ser explicitada. Ela não é isolável dos outros princípios ou axiomas do formalismo; podemos vê-la ao contrário como resumindo a coerência do conjunto das proposições da teoria, e isto com muito mais razão porque todo teste da localidade é um contra-teste da Mecânica Quântica. A falsifiabilidade da inseparabilidade responde ainda à hipótese de Duhem-Quine sobre a impossibilidade de testar isoladamente as partes de uma teoria.

Qualquer que seja a atitude epistemológica que se possa ter em relação à Mecânica Quântica ou, de uma maneira geral, a toda teoria física, resta este fato insuperável da inseparabilidade. Convém notar que as experiências de correlação a distância que o examinam constituem um teste da Mecânica Quântica mais fino do que o conjunto das experiências anteriores, no entanto relativas a uma infinidade de dados, que testemunham por ela uma potência sem precedente na história das teorias físicas. Talvez se apresente o paradoxo mais estranho! O caráter inédito deste teste reside nas distâncias arbitrariamente grandes que estão em jogo, e que não bastam para determinar uma separação no interior dos sistemas quânticos. Era, com o critério de Bell e as experiências de correlação a distância, a partir de então, possível controlar diretamente este estado de coisas ou esta propriedade.

Estabelecendo o caráter irredutível da inseparabilidade quântica, estas experiências - e em particular a de Aspect - se revelam de uma importância tão grande para a Mecânica Quântica como as de Michelson e Morley para a teoria da relatividade restrita. Nem

as primeiras nem as últimas foram verdadeiramente invocadas na elaboração das teorias correspondentes - e a inseparabilidade, notadamente, foi pensada a partir do formalismo bem antes do fato experimental. Mas a ausência de vento do éter constituía em verdade a pedra de toque das novas idéias sobre a relatividade do espaço e do tempo; ainda, as correlações fortes a distância marcam a diferença conceitual mais clara entre a teoria quântica e as idéias de todas as teorias anteriores. E como este foi o caso para o princípio de relatividade, a inseparabilidade quântica deve ser contada no número de princípios mais familiares e mais fundamentais do nosso arsenal teórico.

PENSAR A NÃO-SEPARABILIDADE

O conceito se choca em verdade com o senso comum habitual das noções intuitivas de separação local dos objetos. Mas nós sabemos que as outras concepções quânticas obrigam igualmente a uma crítica radical da noção de espaço e da idéia de localização. As experiências sobre a inseparabilidade indicam que é inútil querer dissolver esta noção nos mecanismos físicos subjacentes. O essencial tendo sido dito do ponto de vista do questionamento físico, toda interrogação sobre a inseparabilidade concerne então a clarificação epistemológica sobre os fundamentos da Mecânica Quântica.

A inseparabilidade é geralmente - dado o critério invocado que a designa aos testes - considerada como equivalente a não-localidade. Ela se exprime mais frequentemente na proposição seguinte: um sistema de partículas correlacionadas não é separável localmente. Mas uma vez compreendido que os sistemas inseparáveis são não-locais, pode-se considerar que os dois conceitos não são de utilização absolutamente idêntica.

De fato, a inseparabilidade faz referência, antes de tudo, a um caráter definitivo H no e pelo formalismo quântico: trata-se da inseparabilidade das funções de onda, da impossibilidade para um vetor de estado de segunda espécie de se transformar por uma ação causal em vetor de estado de primeira espécie⁽²¹⁾. Ao contrário, a não-localidade se relaciona a uma propriedade comparativa: dado um sistema constituído de dois subsistemas, queremos confrontá-lo com uma categorização espacial que não é inicialmente incluída no formalismo. Para alguns, ela o é implicitamente, pois não se saberia pensar num sistema físico sem referência ao espaço, mas parece que isto é uma posição discutível. Apresenta este inconveniente de tomar o espaço como uma categoria à-priori, nos conduzindo de certa maneira a uma posição kantiana sobre o conhecimento. Será necessário, bem entendido, desenvolver extensivamente esta consideração, que nos envia a questão das relações entre os conceitos clássicos e os conceitos quânticos, isto é, novamente, ao debate sobre a natureza do conhecimento levantada desde os inícios da teoria quântica. A aproximação escolhida aqui é a na qual a Mecânica Quântica determina ela mesma a sua referência, quer dizer que ela se esforça em não introduzir outros conceitos ou princípios além dos requeridos pelo próprio formalismo, sendo que este último toma em conta completamente os fatos da experiência. Ela não aceita então sem necessidade e sem crítica a noção de espaço na descrição dos fenômenos; a inseparabilidade lhe parece ser o indicador mais evidente do limite de um tal conceito. Considerando que isto tem um sentido de falar do sistema quântico tomado em si mesmo, antes de toda abordagem experimental, sublinharemos, segundo esta visão, que um sistema quântico estendido não é um sistema macroscópico, e que o espaço não é um primeiro conceito da teoria quântica: sua utilização é submetida a restrições do tipo das indicadas para a não-separabilidade local. Se considerarmos, como o faz certo número de teó

ricos e de comentadores, que a separação local dos sistemas corresponde a uma necessidade primeira do entendimento, não se evitará a dificuldade das chamadas "influências instantâneas a distância", a menos - é claro - de se basear nas teses epistemológicas da escola de Copenhague, que parecem apresentar evidentes fraquezas filosóficas, e que são, em todo caso, incompatíveis com um programa realista em matéria de teoria física.

Falar de influência a distância, entre as duas partículas ou sub-sistemas da experiência de correlação, apresenta na verdade uma dificuldade lógica do simples ponto de vista da consideração do formalismo. Este último, com efeito, impede de designar e de pensar separadamente os sub-sistemas correlacionados do sistema considerado. A idéia de influência a distância, mesmo se considerarmos que se tratam de "influências não físicas", subentende que os sub-sistemas em questão são conceitualmente distintos e separados espacialmente, o que é contraditório com a primeira proposição. Uma tal idéia corresponde então à introdução de uma noção ad hoc, que não tem contrapartida clara nem na realidade física nem no formalismo: ela é então estritamente supérflua. É verdade que se tenta, invocando-o, reconciliar o que a abstração do formalismo pode parecer apresentar de estranho ao entendimento, e as exigências do senso comum para as quais se gostaria de caracterizar este último. De uma maneira geral, a idéia de "influência a distância" funciona, no caso que nos ocupa, como uma noção introduzida do exterior para ajustar o conceito de Inseparabilidade, seja as teorias específicas adicionadas - tal é o caso dos movimentos estocásticos superlumínicos de um éter covariante de Dirac, considerados por J. P. Vigiér⁽²²⁾ -, seja às concepções filosóficas que a priori o aceitam mal; um terceiro caso é o em que ao contrário se aceita a inseparabilidade, a idéia de "influência instantânea" não sendo invocada que para confrontá-la às concepções anteriores, por exemplo às su-

postas resultar da exigência de "realismo físico"⁽²³⁾.

Concluir, da evidência experimental para a inseparabilidade - à das experiências de correlação a distância -, à existência indubitável de influências ou de propagações superlumínicas ou instantâneas, me parece tão arbitrário quanto poderia ser, relativamente às experiências de Michelson e Morley, a dedução de uma contração física na direção do movimento em relação ao éter. Se mostrará, neste último caso, com a teoria da relatividade de Einstein, que esta contração não era mais do que uma propriedade cinemática, isto é uma consequência lógica da nova conceituação do espaço e do tempo. Do mesmo modo a inseparabilidade quântica não é uma propriedade de natureza dinâmica, mas resulta da definição dos sistemas ou dos objetos quânticos, no seio mesmo da teoria.

Convém entretanto notar que a idéia de uma influência, mesmo não física - compreendida num sentido puramente matemático ou no de uma comodidade conceitual -, é bastante significativa de um aspecto do problema de correlações que nos resta discutir: fazendo referência a uma ação entre os dois sistemas, ou sobre eles, ela envia implicitamente ao ato de observação ou de medida. Se invocamos, com efeito, uma influência entre os sistemas, é porque concebemos seus estados como sendo determinados somente a partir do instante mesmo da medida. A idéia de influência exprimiria assim a remanescência do paradoxo sob o desaparecimento aparente ao qual teria sido conduzido pelo formalismo quântico: e esta parte enigmática, que resta sob a aparência das relações e das proposições do formalismo, provém da incerteza em que ainda estamos sobre a significação das operações de medida.

Antes de tratar este último problema, precisamos sublinhar um ponto, sem dúvida alguma fundamental, que liga ainda a inseparabilidade e a completitude ou não da teoria quântica: mas completitude é para ser entendida desta vez no sentido de conclusão. É que

a inseparabilidade, no sentido da não-localidade, se apresenta a nós como o lugar pelo momento irreduzível da diferença - quer dizer, da ausência de relações conceituais e axiomáticas - entre a Mecânica Quântica e a Relatividade. Mas haveria demasiado a dizer sobre este ponto e eu não faço mais do que mencioná-lo. Os desenvolvimentos aos quais deu lugar o conceito de inseparabilidade esclareceram como este conceito não mostrava uma dificuldade interna da Mecânica Quântica; mas ele indica com certeza a dificuldade de sua fusão fundamental com a relatividade. O que nos lembra evidentemente as considerações de Einstein, mas, sob uma luz um pouco distinta.

A INSEPARABILIDADE E O PROBLEMA DE MEDIDA

Nós tentamos levar em conta a inseparabilidade numa abordagem objetiva (correspondendo a um programa filosófico realista sobre o conhecimento). Nos resta esclarecer um aspecto importante. Na perspectiva que escolhemos, ele é secundário, porque não concerne os sistemas em si mesmos, mas a sua observação, mas esta, como sabemos, resta ainda para muitos a dificuldade maior da abordagem objetiva. Podemos ver isto no caso que nos ocupa: para estudar as propriedades dos sistemas quânticos estendidos, e primeiramente para estabelecer a sua inseparabilidade, é preciso proceder a operações de observação e medida.

Segundo a concepção tradicional, é no momento da medida que "a potencialidade", de uma partícula ou de um sistema estar num dado estado, se realiza. Se retomamos o exemplo da molécula separada em dois átomos, será necessário concluir que somente neste instante a quantidade considerada para um dos dois átomos assume o valor dado. Seria então necessário admitir que se passa o mesmo pa-

ra a outra, mas sem medida, já que se trata de um só sistema. A Mecânica Quântica não coloca a questão da distância que separa os dois átomos constituindo este sistema; mas a medida, esta sim, a coloca, e faz assim reaparecer o paradoxo que acreditávamos desaparecido ao nível de consideração dos sistemas. Pois, se medimos simultaneamente as quantidades correspondentes (espin) relativa a cada átomo, a correlação observada não será mais somente a das partes de um microsistema, mas a de dois instrumentos macroscópicos de medida. A questão da transmissão de um sinal é colocada pelos últimos, mesmo que a possibilidade física tenha podido ser eliminada por um dispositivo do tipo do utilizado na experiência de Aspect.

Notemos que esta ressurgência do paradoxo está ligada a uma concepção bem precisa da medida no sentido quântico. É então, no final de contas, ao problema da medida que nos encontramos de frente, problema que pode se formular como: qual é a relação entre o sistema quântico e o aparelho de medida que faz com que tal resultado seja obtido? O problema é o da redução (do pacote de ondas). Ele comporta também um aspecto epistemológico e um aspecto físico, que não são distintos na concepção da escola de Copenhague - contido na teoria de von Neumann e em aproximações mais recentes como a teoria ergódica de Daneri, Loinger e Prosperi⁽²⁴⁾ -, que apela à necessidade, para dar conta dos fenômenos quânticos, a conceitos e a aparelhos clássicos. Distinguir estes dois aspectos, ao contrário, pode conduzir à possibilidade de uma descrição objetiva, isto é puramente quântica, do processo de medida, na qual o aparelho não intervém fundamentalmente, a não ser como um sistema que interage com o sistema estudado (a amplificação ergódica no aparelho macroscópico se efetuando somente após uma redução eventual).

Eu não me proponho aqui, bem entendido, a resolver o problema da teoria da medida. O que me interessa é ver se a significação filosófica de uma teoria quântica da medida pode ser ligada

à questão das correlações a distância entre os sistemas quânticos ou entre os aparelhos de medida. Se existe uma solução satisfatória do ponto de vista objetivo, ela deve ser procurada na direção na qual a consideração da interação dos sistemas quânticos - em estudo e o que representa o aparelho - basta ao problema.

A direção que parece mais apropriada é evidentemente a na qual se considera que não há redução, quer dizer que não é no momento da interação do sistema estudado e do aparelho que o estado do sistema se determina, e que a medida somente transcreve - por cascadadas de interações sucessivas - a informação sobre o estado inicial. Tal é a posição de Margenau insistindo sobre a existência, entre o sistema considerado em si mesmo e o instrumento de medida, do dispositivo de preparação dos estados ⁽²⁵⁾ através do qual tem lugar a determinação do estado do sistema. Esta interpretação é completada pela aceitação do caráter objetivo das probabilidades afetadas a cada estado da superposição - tal é a posição de Bunge ⁽²⁶⁾. Se, fazendo nossa esta concepção, nós voltamos à consideração da correlação entre os dois sub-sistemas, ela não parece mais paradoxal. Ela não se efetua no momento da medida, seja de um, seja de outro, seja dos dois sub-sistemas simultaneamente, numa pretensa "atualização das potencialidades do sistema". Ela é de natureza muito clássica, pois estava determinada desde a cisão do sistema inicial, como era a relação de quantidades como a energia, por exemplo, determinadas de maneira certa (obedecendo a uma regra de "super-seleção"). A diferença é que, no caso considerado, trata-se de quantidades caracterizadas por frequências. De fato, a consideração dos diferentes estados possíveis, quer dizer dos diversos elementos da superposição pela qual representamos geralmente o sistema, convida a tratar as quantidades consideradas seguindo as frequências que lhe são relacionadas, e nos conduz à interpretação objetiva das probabilidades.

Em definitivo, não se saberá então falar de redução da função de onda, senão como uma maneira resumida de dar conta do estado de coisas no fim do processo: pela medida, nós obtemos a informação de que o estado do sistema é um certo estado, correspondente a tal alternativa da preparação.

A teoria de Everett e Wheeler chamada do estado relativo, considera igualmente que não há redução ⁽²⁷⁾. O que é interessante, para o nosso problema, nesta teoria, além de certas obscuridades, é que faz explicitamente apelo à inseparabilidade. Pois a função de onda da parte microscópica do aparelho que interage com o sistema é inseparável da deste último - um e outro estão em estados relativos -, e não se saberia então extraí-la. Segundo Everett, se obtemos um dado estado para a função de onda relativa ao aparelho e em fim de contas ao sistema, é porque a ortogonalidade das diversas funções de onda de cada superposição elimina as componentes que não correspondem ao estado real inicial. Mas trata-se mais de esboço de princípio do que de uma demonstração; e esta proposição, que seria desejável ver demonstrada para obter uma descrição completa do fenômeno de medida, não é mais necessária se nos interessamos somente ao problema de autocoessão da mecânica quântica. Esta, com efeito, pede somente que seja assegurada, pela teoria, a definição dos estados quânticos considerados, sem relacioná-los a sua determinação por um sistema macroscópico. A intervenção da inseparabilidade dos sistemas quânticos em interação - o sistema-objeto e o aparelho -, mostrando a impossibilidade de extrair a função de onda do aparelho ou do sistema (o conhecimento da segunda sendo obtido a partir da primeira), nos leva a concluir à impossibilidade de pretender que o estado do sistema seria determinado pela operação de medida porque isto significaria que separamos as funções de onda.

Se a consideração da medida é então tributária da insepa

rabilidade, isto contorna, do nosso ponto de vista, a lógica do raciocínio. Com efeito, a compreensão dos fatos experimentais de correlação à distância dos sistemas quânticos, fatos dos quais toma em conta o conceito de inseparabilidade, parece depender ainda de uma teoria da medida, pelo papel dos aparelhos sobre a definição do estado do sistema. Se a medida conduz, como na concepção do estado relativo, à inseparabilidade, isto significa que ela não acrescenta nada, à determinação dos sistemas, e que é bem, sem paradoxo nem influência instantânea, com relação a estes sistemas quânticos considerados em si mesmos que as correlações devem ser compreendidas.

(Traduzido por Maria Beatriz Gay Ducati)

AGRADECIMENTOS

A última versão deste texto recebeu comentários de J.S. Bell e B. D'Espagnat. Eu tomo sozinho, é claro, a responsabilidade de suas eventuais imperfeições.

N. de T.: Procurou-se nesta tradução conservar ao máximo o estilo bem particular do autor, não muito comum em publicações científicas.

NOTAS

OBSERVAÇÃO:- Não foi possível explicar com maiores detalhes no presente texto os argumentos caracteristicamente físicos. Para leitura complementar apropriada a não especialistas recomendo artigos e obras de divulgação já publicados sobre o assunto, e, entre eles meus "Nouveaux voyages au pays des quanta" no livro "L'Etrange histoire des quantas" de B. Hoffmann e M. Paty, col. Points-Science-Senil, Paris, 1981, em cujo texto é exposta uma descrição, a mais clara que foi possível, dos problemas físicos.

- 1) Por exemplo a que J. Von Neumann descreveu no seu "Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik (1932); tradução francesa de Alexandre Proca, os "Fondements mathématiques de la mécanique quantique", Presses Univ. de France, Paris, 1947.
- 2) Karl Popper, Logik der Forschung (1935), la logique de la découverte scientifique, trad. do inglês (da edição de 1968) por Nicole Thipsen-Ruten e Philippe Devaux, Payot, Paris, 1973.
- 3) Ver Popper, op. cit., p. 240 e seg. e sobretudo p. 246-250; e a carta de A. Einstein a Popper de 11/09/1935 publicada no apêndice desse livro, p. 468-471.
- 4) Sobre esse ponto, ver Max Jammer, "The Philosophy of quantum mechanics. The interpretation of quantum mechanics in historical perspective, Wiley e Sons, New York, 1974, p. 174. Na realidade essa hipótese de Max Jammer não parece muito plausível (ver a carta de Einstein, em Popper, op. cit., pg. 469).
- 5) Popper, op. cit., pag. 228. Deve-se distinguir essa interpretação de Popper da interpretação objetiva das probabilidades desenvolvida, por exemplo, por Vladimir Fock ou Mario Bunge. Sobre esse ponto, assim como sobre outros aspectos dos problemas levantados aqui e deixados por falta de espaço, remeto a meu trabalho em preparação "La Matière dérabée" que aparecerá em tradução italiana pela Feltrinelli, Milão.
- 6) A. Einstein, B. Podolski e N. Rosen. "Pode a descrição da mecânica quântica da realidade ser considerada completa? Physical Review, 47, 1935, 777.
- 7) Ibid. O grifo é meu (M. Paty).
- 8) Trata-se de uma tirada de Einstein, feita aliás, para insistir sobre o caráter de impossibilidade. (Uma ponta de ironia que deve talvez ser destacada com ênfase).

- 9) No artigo de EPR, são a posição e a impulsão que são consideradas. David Bohm, descrevendo essa experiência imaginária em seu livro "Quantum Theory", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1951, considerou o caso das componentes do spin das partículas. É este caso que foi retomado nos desenvolvimentos posteriores até Bell e nas experiências de correlação à distância.
- 10) N. Bohr "Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?", Phys. Rev. 48, 1935, 696.
- 11) Ver meu trabalho em preparação, op. cit.
- 12) A não separabilidade foi aceita no contexto do formalismo quântico e dependia epistemologicamente do mesmo estatuto que este último: quer como uma concepção do tipo positivista quer como recusa de considerá-lo como fundamental - todas aceitando-o como uma aproximação válida -, mas de forma mais geral, uma neutralidade prática. Comprometida no formalismo, a inseparabilidade aparecia nos cálculos, independente de qualquer interpretação deixada de lado no trabalho prático.
- 13) Ver por exemplo as concepções de Langevin, Fock, Popper e mais recentemente de Bunge.
- 14) Sobretudo, mas não exclusivamente. A visão realista, do gênero da que nos parece dever prevalecer hoje já foi delineada e apontada por um Langevin por exemplo (ver em particular sua crítica das categorias espaço-temporais para descrever os sistemas quânticos) cf. Paul Langevin, "La Notion des corpuscules et d'atomes", Hermann, Paris, 1934.
- 15) Ver, por exemplo, Max Jammer, op. cit., p. 265 et seq., David Bohm, op. cit., Frederik J. Belinfante, "A Survey of hidden variables theories", Pergamon Press, Oxford, 1973.
- 16) John S. Bell - "On the problem of hidden variables in quantum mechanics", Rev. Mod. Physics, 38, 1966, 447.
- 17) John S. Bell - "On the Einstein Podolsky Rosen Paradox", Physics, 1, 1964, 195. Bernard d'Espagnat demonstrou o caráter bem geral da localidade expressa nas desigualdades de Bell simplesmente estabelecendo desigualdades análogas no caso de exemplos figurados (repartições estatísticas de parceiros de casais diferentes). Ver B. d'Espagnat, "A la recherche du réel", Gauthier-Villars, Paris, 1979 e "Théorie quantique et réalité", Pour la Science, nº 27, jan. 1980, p. 72.

- 18) Para revisão dessas experiências ver M. Paty "The recent attempts to verify quantum mechanics" em J. Leite Lopes e M. Paty, eds., Quantum mechanics, a half century later, Reidel, Dordrecht, 1977, pg. 261; John F. Clauser e Abner Shimony "Bell's Theorem: experimental tests and implications", Reports on Progress in Physics, 41, 1978, 1881; Alain Aspect, "Expériences basées sur les inégalités de Bell", em Les implications conceptuelles de la physique quantique, Journal de Physique Supplement Colloque, nº 2, 1981, p. 63. A experiência de Alain Aspect (A. Aspect "Proposed experiment to test the non-separability of quantum mechanics", Phys. Rev. D, 14, 1976, 1944) apresenta essa vantagem de ser relativa a correlação entre fótons distanciados por um intervalo (a-causal) do "gênero espaço" do "cone de luz".
- 19) Pode-se dizer, de forma à primeira vista paradoxal, que os grandes beneficiários do teorema de Bell e das experiências de correlação à distância são os partidários de uma visão realista: porque eles são de agora em diante obrigados a adotar uma concepção não ingênua do realismo.
- 20) Pelo menos aqui falemos da tradução da não localidade nos termos da mecânica quântica. Pois as desigualdades de Bell, contrariadas pela experiência, caracterizam a localidade independentemente de uma dada teoria. Entretanto, é certo que as experiências que lhes dizem respeito se referem a sistemas quânticos, quer dizer efetivamente descritos pela mecânica quântica.
- 21) Cf. por exemplo B. d'Espagnat "Conceptions de la physique contemporaine", Hermann, Paris, 1965; Conceptual foundations of quantum mechanics, Benjamin, Menlo Park, 1971, ed. revista 1976.
- 22) Ver a exposição de Jean-Pierre Vigié neste mesmo "Colloque Popper" de Cerisy/1981.
- 23) B. d'Espagnat, "A la recherche du réel", op. cit. O "realismo físico" tal como entende Einstein e ao qual, segundo ele, é necessário renunciar a favor dum "realismo velado" é mais próximo do realismo (metafísica) clássico que do realismo crítico que é aqui defendido (e que pode, certamente, ser considerado igualmente como uma posição metafísica, mas que se definiu melhor como um "programa filosófico sobre o conhecimento" e deixa uma autonomia maior à física).
- 24) A. Daveri, A. Lainger e G.M. Prospero, "Quantum theory of measurement and ergodicity conditions", Nuclear Physics, 33, 1962, 297.
- 25) Henry Margenau, Physics and philosophy. Selected essays, Reidel, Dordrecht, 1978, p. 203, 207.

26) Ver, por exemplo, Mario Bunge, Foundations of physics, Springer-Verlag, Berlin, 1967; Philosophy of physics, Reidel, Dordrecht, 1973, trad. francesa por F. Balibar, Philosophie de la physique, Senil, Paris, 1975.

27) Hugh Everett III, "Relative state" formulation of quantum mechanics", Rev. Mod. Phys. 29, 1957, 454; John A. Wheeler "Assessment of Everett's "relative state" formulation of quantum theory", Rev. Mod. Phys. 21, 1957, 463. Ver também Jean-Marc Levy Leblond, "Towards a proper quantum theory", in J. Leite Lopes e M. Paty, ed., op. cit., pag. 171.